基于PSASP程序的TCPST潮流建模与仿真

杨永前[1]　陈　曦[2]

（1. 国网江苏省电力工程咨询有限公司　南京　210008
2. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院　南京　210008）



杨永前　男　1990年生，工程师，主要从事电力工程项目管理方面的工作。



陈　曦　男　1988年生，工程师，主要从事配电网规划方面的工作。

摘要：本文针对双芯对称型可控移相器（TCPST）推导了注入功率方程和注入电流模型。针对两种不同的模型，利用电力系统分析综合程序 PSASP 6.2 提供的用户自定义模型，构造了两种适合于 PSASP 的潮流算法，便于进行含 TCPST 电力系统的潮流分析。基于 PSASP 6.2 搭建了 3 机 9 节点系统，并进行仿真。结果表明本文所搭建的两种模型均能有效实现含 TPCST 系统的潮流计算，对于其他电力系统元件建模具有一定的参考意义。

关键词：晶闸管可控移相器　PSASP　建模　仿真　潮流计算

中图分类号：TM743

Modeling and Simulation of Power Flow for TCPST Based on PSASP

Yang Yongqian[1]　*Chen Xi*[2]

（1. State Grid Jiangsu Electric Power Engineering Consulting Co, Ltd.　Nanjing　210008　China
2. State Grid Jiangsu Economic Research Institute　Nanjing　210008　China）

Abstract: Based on current-injected method and power-injected method, two different models of two-core symmetrical thyristor controlled phase shifting transformer (TCPST) are proposed in this paper. Using the user defined model interface of power system analysis software package (PSASP) 6.2, two corresponding models appropriate to PSASP are established, which can be used to analyze the power flow. In order to prove the validity of the two models , a 3-machine 9-bus system for calculation example is established. Calculation result validates the two models are effective to modeling a TCPST.

Keywords: Thyristor-controlled phase shifter, PSASP, modeling, simulation, power flow calculation

1 引言

作为 FACTS 设备的一类，晶闸管可控移相器（Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer，TCPST）不仅能够完成传统机械式移相器调节稳态潮流的任务，还具备对电力系统暂态稳定性产生积极影响的快速响应特性。文献 [1] 对目前已有的 TCPST 类型进行了详细的讨论，并根据拓扑形式的不同进行了分类；文献 [2] 介绍了一种新型的双芯对称离散型可控移相器（Two-Core Symmetrical Discrete Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer，TCSD-TCPST），并针对其数学建模进行了详细的推导。尽管 TCPST 的拓扑结构多种多样，每种 TCPST 的具体模型也不尽相同，但可以根据 TCPST 的相量关系图，利用 TCPST 的串联部分和并联部分的耦合关系建立 TCPST 的数学模型。在可控移相器的潮流计算数学建模中，通常采取注入功率法，其中文献 [3] 推导了理想移相器的节点注入功率模型；文献 [4] 对考虑阻抗值的移相器建模及注入功率模型进行了详细的推导。

为便于新型电力系统元件的数学建模，电力系统分析综合程序 PSASP 6.2 开发了用户自定义模型（User Definition，UD）[5]。文献 [6] 利用 PSASP 的自定义模块 UD 构建了 TCPST 的节点注入功率模型，并在 IEEE 14 节点系统中验证了所建模型的合理性。文献 [7] 利用 PSASP 建立了统一潮流控制器的节点注入功率模型。事实上，TCPST 除了可以用节点注入功率模型进行建模外，还可以利用节点注入电流模型进行建模，而且 PSASP 中 UD 自定义模块预留了注入电流接口，可方便进行建模。

本文针对文献 [2] 提出的移相器模型进行进一步建模分析，推导出了方便潮流计算的节点注入电流模型和节点注入功率模型。利用 PSASP 中的 UD 自定义模块，对这两种模型分别进行建模，并利用 3 机 9 节点系统算例验证了两种模型的有效性。

2 TCPST 潮流计算模型

由文献 [2] 推导可知，安装在系统中 i-j 节点之间的 TCPST，能够用一个具有复变比的理想变压器和相应的等值阻抗表示，如图 1 所示。图 1 中，变压器的复变比 $\dot{T}=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi}$，其阻抗值为 Z_{T}，对应导纳值为 $Y_{\mathrm{T}}=1/Z_{\mathrm{T}}=g_{\mathrm{T}}+\mathrm{j}b_{\mathrm{T}}$。通常情况下，TCPST 的电阻值小，为方便建模及潮流计算，其阻抗值可忽略不计，即 $g_{\mathrm{T}}=0$。

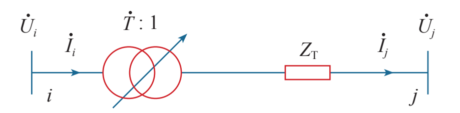


图 1 TCPST 等效电路

Fig.1 The equivalent circuit of TCPST

图 1 中两端口网络的注入电流与节点电压的关系为

$$\begin{pmatrix}\dot{I}_i\\-\dot{I}_j\end{pmatrix}=\frac{1}{Z_{\mathrm{T}}}\begin{pmatrix}1 & -\dot{T}\\-\dot{T}^* & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{U}_i\\\dot{U}_j\end{pmatrix} \tag{1}$$

由式（1）可知，当一个系统含有 TCPST 时，该系统的节点导纳矩阵将为非对称矩阵，且节点导纳矩阵在潮流计算时与移相器有关节点的元素将随移相角的变化而变化。因此，在潮流计算时，势必需要考虑矩阵中的可变元素。而利用 TCPST 的注入电流模型或注入功率模型，可有效避免上述情况的发生，并且方便利用 PSASP 程序的 UD 模块实现与潮流元件的接口。

2.1 节点注入电流模型

为推导 TCPST 的注入电流模型，可根据式（1）先将 TCPST 等值为由一个受控电压源和一个受控电流源组成的受控电源模型，如图 2 所示。

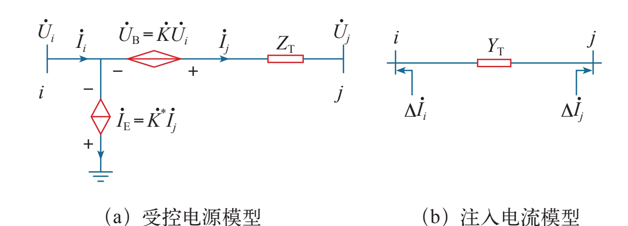


图 2 TCPST 受控电源模型及注入电流模型

Fig.2 The controlled power supply model and current-inject model of TCPST

图 2 中，$\dot{U}_{\mathrm{B}}$、$\dot{I}_{\mathrm{E}}$和$\dot{K}$的表达式为

$$\begin{cases}\dot{U}_{\mathrm{B}}=\dot{U}_j-\dot{U}_i=(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}-1)\dot{U}_i=\dot{K}\dot{U}_i\\ \dot{I}_{\mathrm{E}}=\dot{I}_i-\dot{I}_j=(\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi}-1)\dot{I}_j=\dot{K}^*\dot{I}_j\\ \dot{K}=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}-1=(\cos\varphi-1)+\mathrm{j}\sin\varphi\end{cases} \tag{2}$$

由于 PSASP 中 UD 模型的注入电流接口是由注入电流的虚部和实部表示，因而应先求出节点 i 和节点 j 的注入电流的实部及虚部。为此，可利用诺顿定理，将图 2a 中的串联电压源$\dot{U}_{\mathrm{B}}$与导纳 Y_{T} 串联的含源支路 i、j 化为支路导纳与电流源并联的形式，进而求出图 2b 中 TCPST 在节点 i 和节点 j 的注入电流$\Delta\dot{I}_i$和$\Delta\dot{I}_j$，即

$$\begin{cases}\Delta\dot{I}_i=-\dot{I}_{\rm E}+\Delta\dot{I}_j\\ \Delta\dot{I}_j=Y_{\rm T}\dot{U}_{\rm B}=Y_{\rm T}\dot{K}\dot{U}_i\end{cases}\tag{3}$$

综合式（1）～式（3），可以求出 TCPST 在节点 i 和节点 j 的注入电流的实部及虚部的表达式为

$$\begin{cases}\Delta I_{i\rm R}=[g_{\rm T}(\cos\varphi-1)+b_{\rm T}\sin\varphi]U_{j\rm R}-\\ \qquad[b_{\rm T}(\cos\varphi-1)-g_{\rm T}\sin\varphi]U_{j\rm I}\\ \Delta I_{i\rm I}=[b_{\rm T}(\cos\varphi-1)-g_{\rm T}\sin\varphi]U_{j\rm R}+\\ \qquad[g_{\rm T}(\cos\varphi-1)+b_{\rm T}\sin\varphi]U_{j\rm I}\\ \Delta I_{j\rm R}=[g_{\rm T}(\cos\varphi-1)-b_{\rm T}\sin\varphi]U_{i\rm R}-\\ \qquad[b_{\rm T}(\cos\varphi-1)+g_{\rm T}\sin\varphi]U_{i\rm I}\\ \Delta I_{j\rm I}=[b_{\rm T}(\cos\varphi-1)+g_{\rm T}\sin\varphi]U_{i\rm R}+\\ \qquad[g_{\rm T}(\cos\varphi-1)-b_{\rm T}\sin\varphi]U_{i\rm I}\end{cases}\tag{4}$$

式中，$U_{i\rm R}$、$U_{j\rm R}$ 分别为节点 i 和节点 j 电压的实部；$U_{i\rm I}$、$U_{j\rm I}$ 分别为节点 i 和节点 j 电压的虚部；$I_{i\rm R}$、$I_{j\rm R}$ 分别为节点 i 和节点 j 处 TCPST 注入电流的实部；$I_{i\rm I}$、$I_{j\rm I}$ 分别为节点 i 和节点 j 处 TCPST 注入电流的的虚部。

2.2 节点注入功率模型

由图 2b 可得 TCPST 的注入功率模型如图 3 所示。其中 TCPST 在节点 i 和节点 j 的注入功率 ΔP_i 和 ΔP_j 可表示为

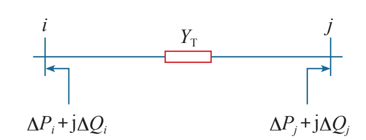


图 3 TCPST 注入功率模型

Fig.3 The power-inject model of TCPST

$$\begin{cases}\Delta P_i+{\rm j}\Delta Q_i=\dot{U}_i\Delta\dot{I}_i^*\\ \Delta P_j+{\rm j}\Delta Q_j=\dot{U}_j\Delta\dot{I}_j^*\end{cases}\tag{5}$$

同样，PSASP 中 UD 模型的注入功率接口是由注入功率的有功和无功表示，可求得 TCPST 在节点 i 和节点 j 的注入功率的实部及虚部的表达式为

$$\begin{cases}\Delta P_i=U_iU_j\{g_{\rm T}[\cos(\varphi+\theta_{ij})-\cos\theta_{ij}]+\\ \qquad b_{\rm T}[\sin(\varphi+\theta_{ij})-\sin\theta_{ij}]\}\\ \Delta Q_i=U_iU_j\{g_{\rm T}[\cos(\varphi+\theta_{ij})-\cos\theta_{ij}]-\\ \qquad b_{\rm T}[\cos(\varphi+\theta_{ij})-\cos\theta_{ij}]\}\\ \Delta P_j=U_iU_j\{g_{\rm T}[\cos(\varphi-\theta_{ji})-\cos\theta_{ji}]+\\ \qquad b_{\rm T}[\sin(\varphi-\theta_{ji})+\sin\theta_{ji}]\}\\ \Delta Q_j=-U_iU_j\{g_{\rm T}[\sin(\varphi-\theta_{ji})+\sin\theta_{ji}]-\\ \qquad b_{\rm T}[\sin(\varphi-\theta_{ji})+\sin\theta_{ji}]\}\end{cases}\tag{6}$$

式中，ΔP_i、ΔP_j 分别为节点 i 和节点 j 的注入有功功率；ΔQ_i、ΔQ_j 分别为节点 i 和节点 j 的注入无功功率；U_i、θ_i 为节点 i 的电压幅值和相位；U_j、θ_j 为节点 j 的的电压幅值和相位；且 $\theta_{ij}=\theta_i-\theta_j$；$\theta_{ji}=\theta_j-\theta_i$。

3 TCPST 用户自定义建模

3.1 PSASP 自定义模型

电力系统分析综合程序（Power System Analysis Aoftware Package，PSASP）是中国电力科学研究院推出的电力系统综合仿真软件。随着电力系统和电力电子技术的发展，新型系统元件不断被开发并在系统中应用，同时新的系统控制技术日益进步。为了顺应趋势，PSASP 设计了用户自定义建模方法，利用用户自定义模型 UD 来模拟新型元件和功能。

用户自定义模型的最小组成部分如图 4 所示，每个功能框可根据输入量（x_1，x_2）完成输出量 y 的运算。PSASP 中的用户自定义模型，是通过各种基本功能框的连接装配设计而成。这些功能框可以方便实现微积分运算、代数运算、基本函数运算、逻辑控制运算、线性和非线性函数运算及其他运算等类型。一个复杂的、新型的电力元件，可以通过足够多的基本功能框进行组合，即可构建所需的模型，完成相应的功能。

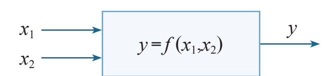


图 4 UD 基本功能框结构

Fig.4 The structure of basic function of UD

每个用户所定义的模型，通过该模型的输入信息 $X(x_1, x_2, \cdots)$ 和输出信息 $Y(y_1, y_2, \cdots)$ 与所研究的电力系统连成一个整体，如图 5 所示。

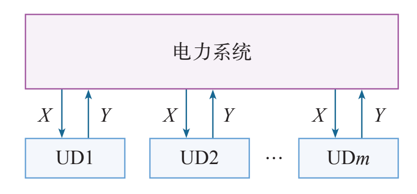


图 5 UD 模型与电力系统的联系

Fig.5 The relationship between UD and power system

由式（4）和式（6）可知，TCPST 的节点注入电流模型和节点注入功率模型均为基本的代数计

算。显然，通过 UD 中的基本功能框，通过彼此连接，即可构建 TCPST 的潮流计算模型，从而完成含 TCPST 系统的潮流仿真计算。

3.2 TCPST 节点注入电流自定义模型

根据式（4），在 PSASP 中，可利用各种基本功能框的连接搭建出 TCPST 节点注入电流的自定义模型如图 6 所示。图 6 中有关参数如下：B1、B2 节点分别为 TCPST 的节点 i 和节点 j；VTR 为节点电压实部；VTI 为节点电压虚部；X(L) 为所需要的线路电抗，即 TCPST 的等值电抗；X0(B1) 为 TCPST 的移相角 φ；输出 ITR 为对应节点母线注入电流的实部；输出 ITI 为对应节点母线注入电流的虚部。需要注意的是，每个基本功能框中的 A 参数需要根据式（4）进行设置，确保模型正确。

3.3 TCPST 节点注入功率自定义模型

根据式（6），在 PSASP 中，利用各种基本功能框的连接可以搭建出 TCPST 节点注入功率的自定义模型如图 7 所示。图 7 中有关参数如下：B1、B2 节点分别为 TCPST 的节点 i 和节点 j；VT 为节点电压幅值；X(L) 为所需要的线路电抗，即 TCPST

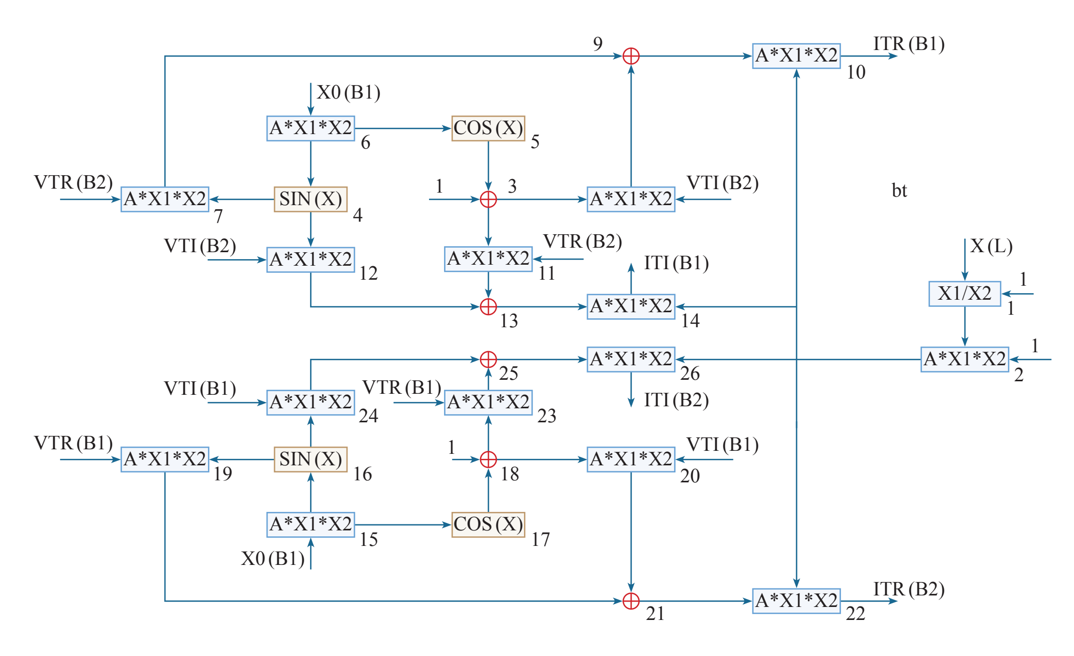


图 6 TCPST 节点注入电流自定义模型

Fi.6 The current-inject UD model of TCPST

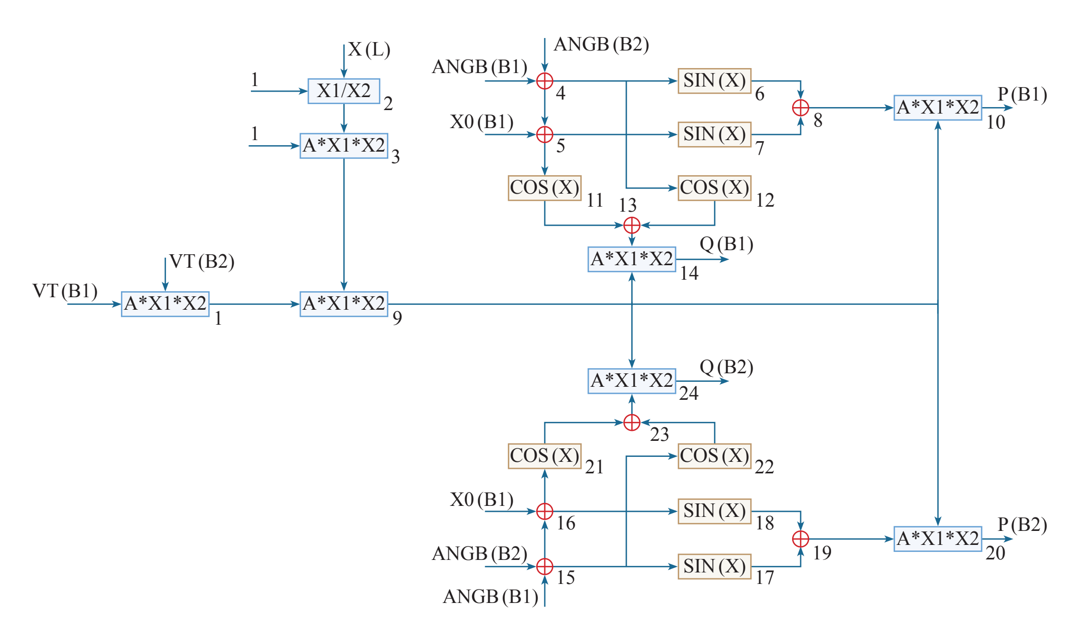


图 7 TCPST 节点注入功率自定义模型

Fig.7 The power-inject UD model of TCPST

的等值电抗；X0(B1) 为 TCPST 的移相角 φ；输出 P 为对应节点母线的注入有功功率；输出 Q 为对应节点母线注入有功功率。同样需要注意的是，每个基本功能框中的 A 参数需要根据式（6）进行设置，确保模型正确。

4 算例分析

下面以安德森 3 机 9 节点测试系统的潮流计算结果为例来说明采用计及阻抗的详细模型的必要性。系统潮流计算数据参见文献 [9]，本文利用 PSASP 搭建的系统如图 8 所示，设移相器安装在线路 8-9 上，分别运用 TCPST 节点注入电流自定义模型、节点注入功率自定义模型进行潮流计算。为验证数据的正确性，同时利用文献 [10] 介绍的 Matpower 软件包搭建系统进行潮流计算对比，如图 8 所示。潮流计算数据见下表。

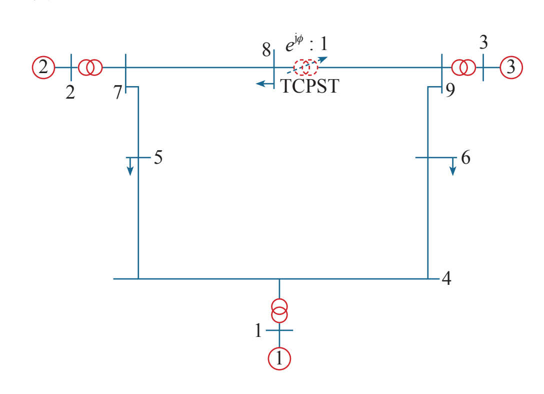


图 8 含 TCPST 的 3 机 9 节点系统单线图

Fig.8 A 3-machine 9-bus system contain a TCPST

表 不同移相角 φ 时 TCPST 支路的有功功率计算结果

Tab. The active power of TCPST branch under different angle of TCPST

移相角 φ/(°)	TCPST 支路有功功率		
	节点注入电流模型	节点注入功率模型	Matpower
7	不收敛	不收敛	不收敛
5	0.369 630	0.369 629	0.369 624
3	0.317 881	0.317 880	0.317 879
0	0.240 123	0.240 121	0.240 119
−3	0.162 286	0.162 284	0.162 288
−5	0.110 408	0.110 407	0.110 413
−7	不收敛	不收敛	不收敛

由上表计算结果可知，利用 TCPST 注入电流自定义模型、节点注入功率自定义模型在 PSASP 中的计算结果，与 Matpower 中含 TCPST 系统的潮流计算结果误差均在 0.1% 内。这表明图 6 及图 7 搭建的用户自定义模型有效，可以为含 TPCST 的系统在 PSASP 中计算提供可靠的参考 UD 模型。

5 结论

本文将 TCPST 等值模型抽象为可控电源模型，并依据可控电源模型推导出了 TCPST 节点注入电流自定义模型、节点注入功率自定义模型详细的表达式。TCPST 注入电流模型和注入功率模型可以避免含 TCPST 系统不对称导纳矩阵的处理，可有效与传统潮流计算程序接口。根据 PSASP 接口数据的特点，本文依据 TCPST 两种不同的模型表达式，搭建了两种不同的适应 PSASP 潮流计算的 UD 模型。此外，本文在安德森 3 机 9 节点系统中对含 TCPST 系统进行了计算，结果表明本文搭建的 TCPST 节点注入电流自定义模型和节点注入功率自定义模型均能有效地描述 TCPST 模型，可为 PSASP 中其他类型的 TCPST 或 FACTS 元件的模型搭建提供参考。

参考文献

[1] Iravani M R, Maratukulam D. Review of semiconductor-controlled (static) phase shifters for power systems applications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(4): 1833-1839.

[2] 杨永前，崔勇，杨增辉，等．双芯对称离散型可控移相器的数学建模 [J]．陕西电力，2014，42(11)：61-67．
Yang Yongqian, Cui Yong, Yang Zenghui, et al. Modelling of two-core symmetrical discrete thyristor controlled phase shifting transormer[J]. Shanxi Electric Power, 2014, 42(11): 61-67.

[3] Han Z X. Phase shifter and power flow control[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(10): 3790-3795.

[4] Noroozian M, Andersson G. Power flow control by use of controllable series components[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1420-1429.

[5] 中国电力科学研究院．电力系统分析综合程序用户手册 [M]．北京：中国电力科学研究院，2005．

[6] 刘前进，黎雄，孙元章．基于 PSASP 程序的 FACTS 潮流建模 [J]．电网技术，2000(7)：6-9．
Liu Qianjin, Li Xiong, Sun Yuanzhang. Power flow modelling of FACTS based on PSASP[J]. Power System Techonlogy, 2000(7): 6-9.

[7] 姚蜀军，宋晓燕，汪燕．基于 PSASP 的统一潮流控制器潮流建模与仿真 [J]．华北电力大学学报 (自然科学版)，2011，38(5)：11-16．
Yao Shujun, Song Xiaoyan, Wang Yan. Power flow modelling of unified power flow controller base on power system analysis software pcckage(PASAP)[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2011, 38(5): 11-16.

[8] Anderson P M, Fouad A A. Power system control and stability[M]. Wiley. com, 2008.

[9] Zimmerman R D, Murillo-Sánchez C E, Thomas R J. Matpower: steady-state operations, planning and analysis tools for power systems research and education[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 12-19.